

*Показана технологія модифікування шарів пористого кремнію методом електрохімічної гідрогенізації з наступним використанням в фронтальному покритті кремнієвого сонячного елемента. Дослідження властивостей фронтальної поверхні структури сонячного елемента проводилося з допомогою вивчення спектрів фотолюмінісценції, а також мас-спектрів вторинних іонів (SIMS) гідрогенізованих шарів пористого кремнію. Функціональні шари пористого кремнію без-, і з гідрогенізованим пористим кремнієм використані для фронтальної поверхні сонячного елемента*

*Ключові слова: сонячний елемент, пористий кремній, фотолюмінісценція, електрохімічна гідрогенізація, мас-спектри*

*Показана технология модифицирования слоев пористого кремния методом электрохимической гидрогенизации с последующим использованием в фронтальной поверхности кремниевого солнечного элемента. Исследование свойств фронтальной поверхности структуры солнечного элемента проводилось с помощью изучения спектров фотолюминесценция, а также масс-спектров вторичных ионов (SIMS) гидрогенизированных слоев пористого кремния. Полученные функциональные слои пористого кремния использованы для фронтальной поверхности солнечного элемента непосредственно, и с гидрогенизированным пористым кремнием*

*Ключевые слова: солнечный элемент, пористый кремний, фотолюминесценция, электрохимическая гидрогенизация, масс-спектры*

# МОДИФІКУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОРИСТОГО КРЕМНІЮ ДЛЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ ГІДРОГЕНІЗАЦІЇ

**В. Ю. Єрохов**

Доктор технічних наук, доцент\*

E-mail: verohov@polynet.lviv.ua

**А. О. Дружинін**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

**О. В. Єрочева**

Аспірант

Інститут прикладних проблем  
математики і механіки ім. Я. С. Підстригача

Національна академія наук України

вул. Наукова, 3-б, м. Львів, Україна, 79060

E-mail: mlleolga@gmail.com

\*Кафедра напівпровідникової електроніки

Національний університет „Львівська політехніка”

вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

## 1. Вступ

На сьогоднішній день більше 2 мільярдів людей на планеті все ще залежать від газу, дров, вугілля і нафти для приготування їжі і обігріву приміщень. Це, приводить до значних негативних наслідків для здоров'я людей, їх навколишнього середовища, економічного розвитку, а інколи і війн між державами.

І вже в найближчі десятиріччя виробники енергії зіткнуться з нестачею природного палива (нафти, газу, вугілля), а також з такими проблемами, як катастрофічне забруднення навколишнього середовища, до якого приводить спалювання цього палива, та потенційна небезпека ядерної енергетики. Отже, постає необхідність одержання дешевої енергії з використанням відновлювальних джерел живлення при мінімальному впливі на навколишнє середовище. Тому вже зараз широкого розвитку набуває так звана «альтернативна» чи «нетрадиційна» енергетика, яка використовує практично невичерпні ресурси [1].

До використання сонячної енергії привернуто увагу багатьох дослідників у всьому світі. Впровадження нетрадиційних джерел енергії стає вигідніше, як з економічної, так і з екологічної точки зору. Важливим є як чисте екологічно перетворення сонячних променів

в електрику так і їх тепло. Зріс інтерес, як до теоретичних, так і до практичних розробок в області фотоелектричних перетворювачів сонячного випромінювання.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Одною з найперспективніших серед них на сьогоднішній день вважається сонячна енергетика. Вона використовує пряме перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) або сонячних елементів (СЕ). Особливу увагу викликав фотоелектричний метод перетворення сонячної енергії. Підвищений інтерес до даного методу отримання електричної енергії зумовлений можливістю створення на його основі сонячних елементів, коефіцієнт корисної дії (ККД) яких може перевищувати 15 %, а в деяких зразках досягати 50 %. Вони відрізняються виключною стабільністю параметрів, що підтверджені в ході їх багаторічної експлуатації [2, 3].

Основним компонентом для побудови фотоелектричних систем є сонячні батареї з яких формуються сонячні панелі. Одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ККД фотоелектричних систем є зменшення оптичних втрат, тобто втрат на відбивання. Це досягається

ся нанесенням антивідбивних покриттів, які надають можливість суттєво зменшити втрати на відбивання сонячних променів, тобто збільшити їх поглинання. Одним з ефективних і сучасних методів є використання шарів пористого кремнію в структурах кремнієвих СЕ на основі розгляду мікроструктури і властивостей цього матеріалу, аналізу існуючого досвіду і нових перспективних шляхів його фотовольтаїчного використання.

При використанні пористого кремнію в якості антивідбивного покриття пористий шар формується безпосередньо на кремнієвій поверхні і поряд з просвітленням він повинен забезпечувати також і пасивацію поверхні ФЕП. Однак, результати досліджень в даній області виявили, що пасивуючі властивості пористого кремнію є недостатніми для мінімізації поверхневої рекомбінації. Часткового покращення пасивуючих властивостей пористого кремнію було досягнуто шляхом термічного та анодного окислення пористого шару, а також при плазмовому напиленні на його поверхню нітриду кремнію. Проте жоден з перелічених методів не дозволив досягнути необхідного рівня поверхневої пасивації та її стабілізації у часі.

В той же час фотоенергетика є найбільш елегантним засобом вироблення електрики без рухомих частин, газів, виділення чи шуму – і все це при можливості конвертації безмежної кількості сонячної енергії [4]. Широке впровадження фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) різного рівня потужності, як джерел живлення електронних приладів є одним з найбільш перспективних засобів використання сонячної енергії, що пов'язано з виснаженням запасів енергетичної сировини на Землі та безперервним зростанням потреб людства в дешевій електричній енергії [5–7]. Це стало поштовхом до розвитку високопотужної сонячної енергетики, яка змогла б скласти конкуренцію традиційним методам генерації електрики для забезпечення енергетичних потреб людства.

Ціла низка переваг, характерних для фотоенергетики, визначає напрями досліджень, а попит і проблеми, пов'язані з традиційними джерелами енергії визначає обсяг урядових програм, що стимулює виробництво. Прагнення до зниження вартості, підвищення технічних та фотоелектричних параметрів ФЕП приводить до розроблення та вдосконалення технологій створення нових структур ФЕП. Кремній, як матеріал, залишається найбільш поширеним в природі, так як і найбільш використовуваним в фотоенергетиці, тому найбільший інтерес представляють дослідження в області кремнієвих ФЕП, оскільки станом за останні десять років більшість промислових наземних фотоелектричних систем розробляються на основі кристалічного кремнію з середнім значенням ефективності перетворення 16 %...18 %...20 %.

Для зниження собівартості виготовлення високопотужних фотоелектричних систем часто використовують різні підходи. Для першого характерні заходи підвищення коефіцієнта корисної дії (ККД) сонячних елементів. До іншого максимальна увага надається спрощенню і здешевленню технології виробництва ФЕП. Відповідно до першого підходу основою високопотужної сонячної енергетики стали кремнієві сонячні елементи з дифузійним р-п- переходом, для яких досягнуті найвищі значення ККД. Проте, незважаючи на високу ефективність, собівартість цих сонячних елементів залишається високою унаслідок значної складності їх технологічної реалізації.

На сьогодні людство використовує так звану «Третю генерацію» електрики, в основі якої є квантові трубки і наноструктури. Введення в структуру ФЕП кремнієвих функціональних пористих матеріалів дозволить керувати їх ефективністю перетворення і досягати мети, яка би послідовно збільшувала ефективність перетворення при зменшенні собівартості сонячних елементів. Функціональні поруваті матеріали можна отримувати у вигляді шарів з достатньо великим діапазоном поруватості, в діаметрі пор від нанометрів до десятків мікрометрів [8]. При тому маємо великий спектр технологій отримання.

Сучасні високоефективні покриття, як відбиваючі так і пасивуючі, залишаються на сьогодні складними для технологічної реалізації, а при їх формуванні поспрощені технології не володіють необхідними просвітлювальними (антивідбивними) та пасивувальними властивостями. Введення пористих шарів кремнію у структури антивідбивного покриття з різною текстурою фронтальної поверхні ФЕП робить актуальними ці дослідження в галузі фотоенергетики для підвищення ефективності сонячних елементів [9].

Ефективним методом покращення пасивуючих властивостей пористого кремнію може стати його електрохімічна гідрогенізація [10] в збагачених атомарним воднем електролітах. За допомогою даної обробки можна досягнути ефективної пасивації воднем обірваних зв'язків на межі поділу пористий кремній/монокристалічний або полікристалічний кремній, що сприятиме зменшенню швидкості поверхневої рекомбінації.

Використовуючи електрохімічну гідрогенізацію ми отримали можливість ефективно модифікувати фронтальні поверхні, отримуючи різні функціональні покриття, які треба навчитись використати в структурах СЕ для суттєвого збільшення їх ефективності (ККД).

У порівнянні з іншими методами водневого насичення електрохімічна гідрогенізація володіє рядом переваг [11, 12]. Безперечною позитивною рисою, це їх дешевизна і можливість запровадження в більшості технологічних лабораторій. Наявність технологічних складових і проведення технологічного процесу при кімнатній температурі сьогодні, при високих цінах на газ і електрику, є безперечним плюсом для використання власне такого методу пасивації поверхні кремнієвих пластин, які будуть використовуватись для сонячних елементів, зменшуючи їх кінцеву ціну.

Електрохімічна гідрогенізація може бути суміщена з процесом анодування і не приводить до ускладнення технології ФЕП, є контрольованим процесом, що забезпечує проникнення атомів водню в об'єм напівпровідника на задану глибину та пасивування обірваних зв'язків без пошкодження його кристалічної ґратки [13].

---

### 3. Мета і завдання дослідження

---

Метою роботи було створення сонячного елемента з антивідбивним покриттям на пористому кремнію, для чого проводилось вивчення електрохімічної гідрогенізації шарів пористого кремнію для використання в антивідбивних покриттях кремнієвих сонячних елементів з допомогою вивчення спектрів фотолюмінесценції, а також мас-спектрів гідрогенізованих шарів пористого кремнію.

Для досягнення поставленої мети ставилися наступні завдання:

- дослідження електрохімічної гідрогенізації шарів пористого кремнію з допомогою режиму катодної поляризації;
- вивчення спектрів фотолюмінесценції для дослідження ступеня впливу електрохімічної гідрогенізації на пасивуючі властивості пористого кремнію як антивідбивного покриття;
- вивчення мас-спектрів вторинних іонів (SIMS) гідрогенізованих шарів пористого кремнію отриманих в статичному режимі після гідрогенізації (наявність  $H_2^+$ );
- вимірювання вихідних електричних характеристик створеного сонячного елемента (ФЕП) до, та після формування на його поверхні антивідбивного покриття на основі гідрогенізованого пористого кремнію.

#### 4. Вплив електрохімічної гідрогенізації на покращення пасивуючих властивостей пористого кремнію

З метою покращення пасивуючих властивостей шарів пористого кремнію, що використовуються у ФЕП проведено дослідження процесу електрохімічної гідрогенізації пористого кремнію на підкладках кремнію р- типу з питомим опором 0,1...10 Ом·см та на підкладках із сформованим емітерним переходом  $p^+-p$ . В якості електроліта використовувався розчин  $HF:C_2H_5OH=1:1$ . Струм та час анодування змінювались у широкому інтервалі значень, що забезпечувало формування шарів пористого кремнію з різною пористістю та товщиною.

Для протікання процесу електрохімічної гідрогенізації пористого кремнію при його катодній поляризації досліджувались потенціостатичні криві струм-напруга системи Pt(анод) – електроліт – «пористий кремній/кремній»(катод) для електролітів з різним хімічним складом. Дослідження проводились за методикою, аналогічною методиці реєстрації потенціостатичних кривих процесу електрохімічного анодування, але розгортка напруги здійснювалась у напрямку від'ємних значень (катодний процес).

Із отриманих залежностей (рис. 1) встановлено, що процес гідрогенізації шарів пористого кремнію сильно залежить від типу та величини електричної провідності вихідної напівпровідникової підкладки.

Встановлено, що обмежуючим фактором катодного процесу є рівень концентрації електронів у приповерхневій області напівпровідника. Внаслідок цього гідрогенізація шарів пористого кремнію, що вирощені на підкладках n- типу, або на поверхні емітера структури з  $p^+-p$  переходом протікає без завад. Однак для підкладок р-типу електрони є неосновними носіями і їх концентрація недостатня для протікання процесу гідрогенізації, оскільки величина катодного струму є обмеженою потенційним бар'єром у приповерхневій області напівпровідника.

В результаті цього для потенціостатичних кривих гідрогенізації шарів пористого кремнію, що вирощені на р-Si, є типовою наявність двох характерних областей – області гідрогенізації та області насичення

(рис. 1). Область насичення має місце для низьких значень напруги поляризації та залежить від ступеня легування напівпровідника. Її характерною рисою є відсутність суттєвого збільшення катодного струму при зростанні величини напруги поляризації. Це пояснюється як недостаткою електронів, так і низькою енергією активації атомів водню та їх неспроможністю проникнути через потенційний бар'єр.

Зі збільшенням напруги катодної поляризації для низькоомного кремнію р- типу настає пробій n-p переходу і його наявність вже не є обмежуючим фактором для протікання катодного струму. Як результат цього, область гідрогенізації характеризується ділянкою потенціостатичних кривих, де незначне збільшення напруги зміщення сприяє сильному зростанню катодного струму.

При низькій концентрації акцепторів приповерхнева область просторового заряду значно ширша і її пробій не настає навіть при вищій напрузі на катоді. У цьому випадку для ефективної гідрогенізації пористого кремнію, вирощеного на слабологованому кремнію р- типу запропоновано використовувати фотогенерацію струму у кремнію. Спричинена освітленням генерація електронів сприяє початковому збільшенню катодного струму. Подальше збільшення величини напруги катодної поляризації приводить до пробію приповерхневого потенційного бар'єру та різкого збільшення катодного струму, що знаменує собою початок процесу гідрогенізації.

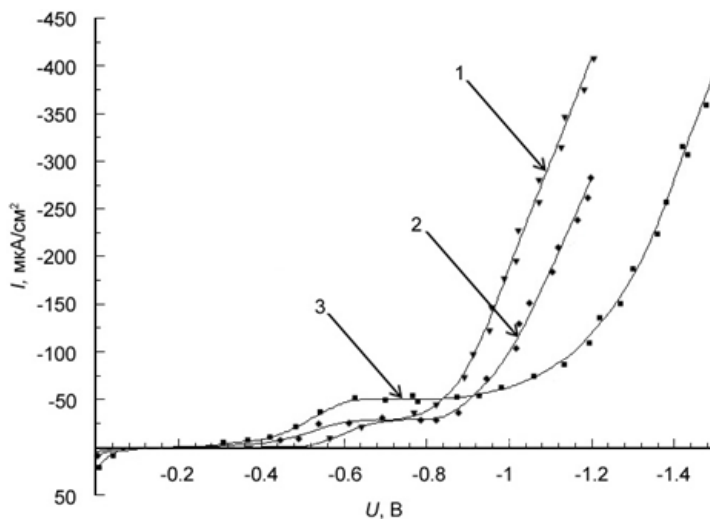


Рис. 1. Потенціостатичні криві Pt(анод) – електроліт – «пористий кремній/кремній»(катод) для зразків з пористим кремнієм із різною витримкою після анодування в порівнянні з чистою поверхнею підкладки: 1 – свіжовирощені зразки пористого кремнію на підкладці р-Si; 2 – зразки пористого кремнію вирощені на підкладці р-Si з витримкою після анодування 24 год.; 3 – чиста поверхня підкладки р-Si

Для вивчення ступеня впливу електрохімічної гідрогенізації на пасивуючі властивості пористого кремнію доцільно використати метод фотолюмінесценції. Оскільки у цілому ряді робіт [14, 15] показано, що інтенсивність фотолюмінесценції пористого кремнію визначається співвідношенням між випромінювальною та безвипромінювальною рекомбінацією носіїв заряду відповідно в об'ємі та на поверхні кла-

стерів квантових ниток, то слід очікувати, що воднева пасивація поверхні пористого кремнію повинна впливати і на його люмінесцентні властивості.

Підвищення інтенсивності фотолюмінесценції пористого кремнію свідчить про покращення його пасивуючих властивостей. При дослідженні люмінесцентних властивостей шарів гідрогенізованого пористого кремнію була встановлена значна залежність інтенсивності фотолюмінесценції від хімічного складу електроліта гідрогенізації, величини катодного струму та тривалості процесу водневого насичення. Це дозволило оптимізувати технологічні параметри процесу електрохімічної гідрогенізації пористих шарів з метою покращення їх люмінесцентних властивостей.

Порівняння спектрів фотолюмінесценції свіжовирощених, хімічно оброблених та гідрогенізованих пористих шарів показало, що водневе насичення поверхні пористого кремнію в процесі його катодної поляризації підвищує інтенсивність фотолюмінесценції до рівня, характерного для зразків, що попередньо пройшли спеціальну хімічну обробку. Однак на відміну від свіжоанодованих та хімічно оброблених зразків, гідрогенізований пористий кремній володіє більш широким спектром люмінесцентного випромінювання. При цьому для положення максимуму спектру фотолюмінесценції гідрогенізованого пористого шару спостерігається голубе зміщення на 10÷15 нм. Поряд із цим смуга спектру фотолюмінесценції пористого кремнію після гідрогенізації розширюється на 20÷40 нм за рахунок зміщення його високоенергетичної сторони (рис. 2). Як в першому, так і в другому випадку величина зміщення максимального значення інтенсивності люмінесценції визначається струмом гідрогенізації та тривалістю катодної обробки.

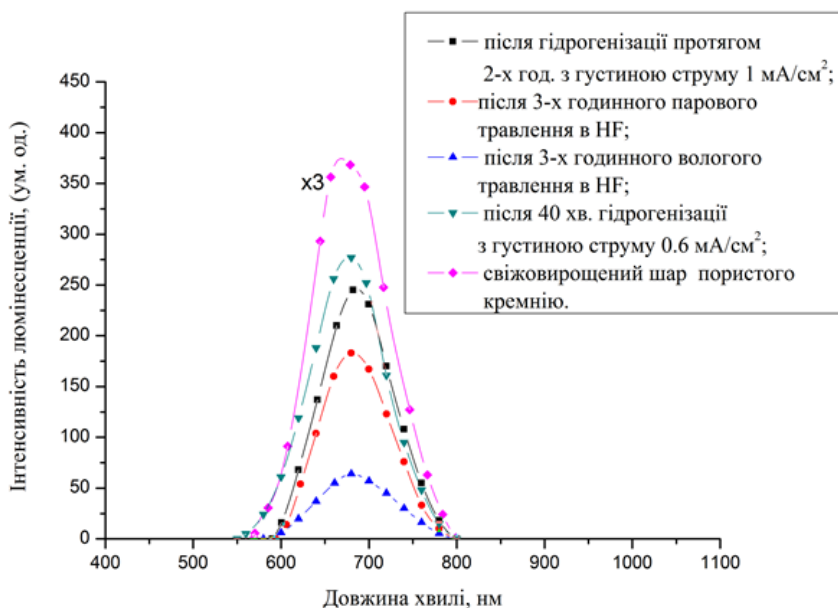


Рис. 2. Спектри фотолюмінесценції шарів пористого кремнію: ( Ag+-лазер,  $\lambda=488\text{nm}$ , 300 K)

Приведені вище результати дослідження люмінесцентних властивостей шарів гідрогенізованого пористого кремнію можуть інтерпретуватися збільшенням інтенсивності фотолюмінесценції шарів гідрогенізованого пористого кремнію та її кореляцією

з інтенсивністю випромінювання пористих шарів, з водневою пасивацією шляхом травлення в HF, що свідчить про насичення атомами водню поверхні пористого кремнію у процесі катодної поляризації. Завдяки водневому насиченню обірваних зв'язків на поверхні пористого кремнію досягається зменшення частки безвипромінювальної поверхневої рекомбінації по відношенню до випромінювальної рекомбінації в їх об'ємі.

Зміщення максимуму спектру фотолюмінесценції шару пористого кремнію після його катодної поляризації може бути пояснено в рамках теорії квантового обмеження і свідчить про вплив електрохімічної гідрогенізації на мікроструктуру самого пористого шару. Очевидно, що у даному випадку має місце окислення поверхні квантових ниток пористої структури, через що відбувається зменшення їх діаметра. Це приводить (завдяки існуванню в пористому кремнії квантово-розмірного ефекту та пов'язаної з ним залежності  $E_g$  від діаметру квантової нитки) до збільшення ширини забороненої зони пористого кремнію і, відповідно, до зменшення довжини хвилі максимуму фотолюмінесцентного випромінювання.

Розширення спектру фотолюмінесценції пористого кремнію під впливом катодної поляризації, очевидно, є наслідком сукупного впливу ефектів, в вищеописаних абзацах. Голубий зсув високоенергетичної сторони спектру люмінесцентної емісії, швидше за все, є наслідком окислення поверхні квантових ниток та пов'язаного із цим збільшення ширини забороненої зони пористого кремнію. Незмінність спектрального положення низькоенергетичної частини спектру фотолюмінесценції можна пояснити, прийнявши до уваги структурну неоднорідність пористого шару. Імовірно, що проникнення в процесі гідрогенізації атомів водню в глибину пористого

кремнію та пасивація стінок квантових ниток дозволяє глибшим шарам пористого кремнію також здійснювати свій вклад в інтегральне люмінесцентне випромінювання. Оскільки зі збільшенням глибини діаметр квантових ниток зростає, то для шарів гідрогенізованого пористого кремнію слід очікувати збільшення зовнішнього квантового виходу фотолюмінесценції в його низькоенергетичній частині.

Інтерпретація експериментальних результатів, отриманих при дослідженні фотолюмінесцентних властивостей гідрогенізованого пористого кремнію, однозначно свідчить про те, що в процесі катодної поляризації пористого шару має місце введення атомарного водню в його структуру та пасивація обірваних кремнієвих зв'язків, що підтверджується експериментами на мас-спектрометрі вторинних іонів (рис. 3), де після гідрогенізації ми можемо бачити стійку інтенсивність (кількість зчитаних імпульсів) вторинних іонів поверхні мультикристалічної підкладки кремнію типу Baysix в статичному режимі з наявністю іонів  $\text{H}_2^+$  [16].

Поверхні для виміру в спектрі вторинних іонів гідрогенізовані воднем в електроліті (HF:C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH=10:1) на основі фтористоводневої кислоти.

З використанням оптимізованих умов процесу електрохімічного анодування на поверхні структур мульткристалічних кремнієвих ФЕП було сформовано антивідбивне покриття на основі гідрогенізованого пористого кремнію.

Вимірювання вихідних електричних характеристик ФЕП до та після формування на їх поверхні антивідбивного покриття на основі гідрогенізованого ПК проводилось з використанням імітатора сонячного світла для спектру АМ 1.5. Результати вимірювань оброблялись спеціалізованою комп'ютерною програмою і виводились у вигляді ВАХ фотоперетворювача із вказанням максимальних значень фотоструму та вихідної напруги, струму короткого замикання та напруги неробочого ходу а також коефіцієнта заповнення та коефіцієнта корисної дії (ККД) ФЕП.

Характеристики ФЕП, отримані з використання запропонованих технологій, приведені в таблиці (табл. 1). На основі узагальнення отриманих експериментальних результатів було виявлено механізм та ступінь впливу фронтального пористого шару на параметри досліджуваних ФЕП. Встановлено, що для мульткристалічних ФЕП ефект від використання в їх структурі шару гідрогенізованого ПК проявляється для струму короткого замикання I<sub>sc</sub>. Для обох типів ФЕП приріст фотоструму ≈2÷10 мА. При цьому має місце збільшення напруги неробочого ходу V<sub>oc</sub> в межах 2,5 %.

Збільшення спостерігається для фактору заповнення FF на 3÷5 % для мульткристалічних ФЕП. Для всіх зразків дослідної партії ФЕП було одержано суттєвий приріст значення ККД. Для кращих зразків мульткристалічних ФЕП площею 0,93 см<sup>2</sup> ефективність (ККД) фотовольтаїчного перетворення після формування на їх поверхні шару гідрогенізованого пористого кремнію зросла в 1,28 раза (табл. 1).

Таблиця 1  
Характеристики ФЕП з антивідбивним покриттям на основі гідрогенізованого пористого кремнію площею 0,93 см<sup>2</sup> при потужності освітлення 1000 Вт/м<sup>2</sup> (АМ 1,5)

Збільшення спостерігається для фактору заповнення FF на 3÷5 % для мульткристалічних ФЕП. Для всіх зразків дослідної партії ФЕП було одержано суттєвий приріст значення ККД. Для кращих зразків мульткристалічних ФЕП площею 0,93 см<sup>2</sup> ефективність (ККД) фотовольтаїчного перетворення після формування на їх поверхні шару гідрогенізованого пористого кремнію зросла в 1,28 раза (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики ФЕП з антивідбивним покриттям на основі гідрогенізованого пористого кремнію площею 0,93 см<sup>2</sup> при потужності освітлення 1000 Вт/м<sup>2</sup> (АМ 1,5)

№	Характеристики ФЕП	ФЕП без гідрогенізованого ПК	ФЕП з гідрогенізованим ПК
1	I <sub>sc</sub>	28,5 мА	30,8 мА
2	V <sub>oc</sub>	0,63	0,66 В
3	FF (показник заповнення ВАХ)	0,78	0,81
4	Е <sub>ff</sub> (ККД)	12,6 %	16,1 %

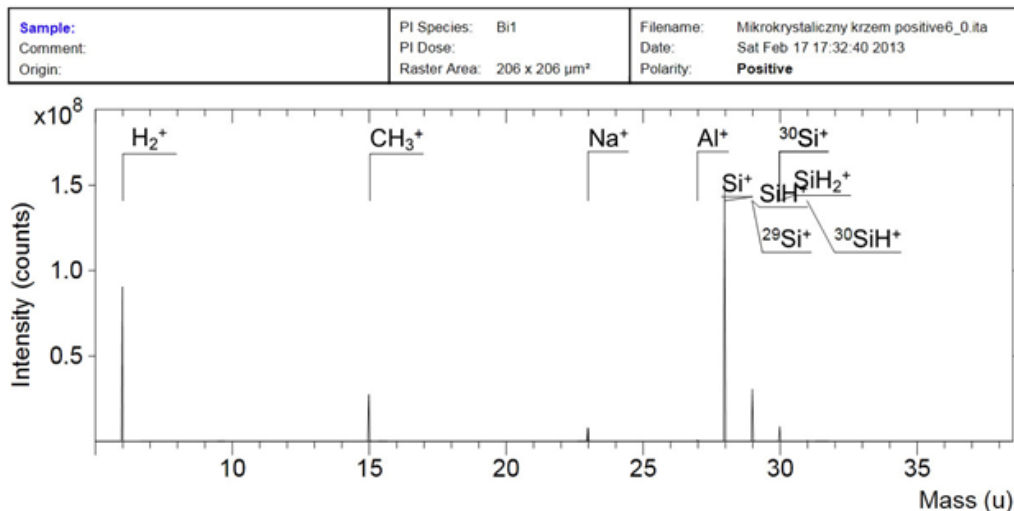


Рис. 3. Картина діалогового вікна мас-спектрометра TOF5 SIMS поверхні мульткристалічних підкладок Si типу Baysix в статичному режимі після гідрогенізації (наявність H<sub>2</sub><sup>+</sup>). Mass (u) — масове число. Intensity (counts) — інтенсивність (кількість зчитаних імпульсів)

### 5. Оптимізація технології електрохімічного формування та гідрогенізації шарів пористого кремнію

Оптимізація технології електрохімічного формування та гідрогенізації шарів пористого кремнію дозволила суттєво покращити її антивідбивні та пасивні властивості. Але, для того щоб пористий кремній ефективно використовувався в якості антивідбивного покриття в структурі кремнієвих ФЕП, його параметри та технологія одержання повинні задовольняти двома наступним вимогам:

а) параметри провітлюючих пористих шарів не повинні негативно впливати на вихідні електричні характеристики та ККД ФЕП;

б) технологічні процеси формування та гідрогенізації шарів ПК повинні бути сумісними з технологією створення кремнієвих ФЕП та не ускладнювати її.

Тому, згідно першій вимозі товщина поруватого шару не повинна перевищувати 100 нм. За таких умов вплив високого питомого опору пористого кремнію (~10<sup>6</sup>÷10<sup>7</sup> Ом·см) на послідовний опір структури ФЕП буде знаходитись в допустимих межах.

Технологічний процес формування фронтальної контактної системи включав послідовне термовакuumне напылення на кремнієву поверхню через металічні трафарети шарів Ti, Pd та Ag товщинами 30 нм, 20 нм та 30 нм відповідно. Ширина контактних пальців при цьому становила 30 мкм, при відстані між ними більше 1 мм. При цьому загальна площа затінення робочої поверхні не перевищувала 5 %. Для зменшення контактного опору товщина шару Ag була збільшена гальванічним методом до 25 мкм. На завершальному етапі створення контактної гребінки проводився відпал одержаних структур у атмосфері азоту з 5 % вмістом водню при температурі 400 °C на протязі 20 хв.

Узагальнення та аналіз отриманих результатів свідчить про те, що приріст фотоструму та ККД в основному зумовлений мінімізацією оптичних втрат на відбивання. Це корелює зі зменшенням величини інтегрального коефіцієнта оптичного відбивання оптимізованих шарів ПК. Збільшення фактору заповнення, обумовлене зі зростанням послідовного опору структури ФЕП внаслідок зменшення товщини емітера та концентрації легуючої домішки в його приповерхневому шарі. Збільшення напружки неробочого ходу, імовірно обумовлене зміною резистивних втрат в структурі ФЕП, та недостатньо якісною пасивацією її фронтальної поверхні. Таким чином можна зробити висновок що пасивація поверхні ФЕП шару ПК воднем в процесі його електрохімічної гідрогенізації є недостатньо ефективною та нестабільною в часі.

## 7. Висновки

Результатом даної роботи стала розробка сонячного елемента з антивідбивним покриттям на основі гідрогенізованого пористого кремнію.

На основі аналізу механізму впливу покриття про-світлення на основі гідрогенізованого ПК на вихідні характеристики кремнієвих ФЕП було розроблено наступні рекомендації щодо подальшого підвищення ККД ФЕП з шаром ПК:

1. Для зменшення резистивних втрат та фактору заповнення ФЕП з антивідбивним покриттям на основі шару пористого кремнію необхідно оптимізувати глибину та профіль легування емітерної області даної структури. Необхідно врахувати той факт, що після формування шару пористого кремнію як товщина емітера, так і поверхнева концентрація домішки легування зазнають суттєвих змін. Збільшення поверхневого опору емітерного шару при формуванні пористого кремнію можна компенсувати шляхом збільшення глибини р-п емітерного переходу на товщину пористого шару та збільшенням поверхневої концентрації домішки легування.

2. ККД ФЕП з антивідбивним шаром пористого кремнію може бути збільшений шляхом зменшення рекомбінаційних втрат за рахунок покращення пасивуючих властивостей пористого шару в процесі його електрохімічної гідрогенізації.

Враховуючи нестійкість водневої пасивації до впливу навколишнього середовища, стабілізацію пасивуючих властивостей гідрогенізованого ПК найбільш доцільно здійснювати шляхом його капсуляції. При цьому необхідно врахувати, що для забезпечення ефективного просвітлення значення показника заломлення капсулюючого шару повинно знаходитися в діапазоні від 1.4 до 1.6, а сам процес капсулювання не повинен призводити до окислення пористого шару кремнію (температура процесу не повинна перебільшувати 150 °C).

## Література

- Huang, Y. M. Porous silicon based solar cells [Text] / Y. M. Huang, Q.-L. Ma, M. Meng // *Materials Science Forum*. – 2011. – Vol. 663-665. – P. 836–839. doi: 10.4028/www.scientific.net/msf.663-665.836
- Weber, K. J. Silicon liquid phase epitaxy for epilift solar cells [Text] / K. J. Weber; A. W. Blakers; M. J. Stocks, A. Thompson // *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference*. – 2003. – Vol. 2. – P. 1265–1267.
- Bilyalov, R. R. Multicrystalline silicon solar cells with porous silicon emitter [Text] / R. R. Bilyalov, R. Lüdemann, W. Wettling, L. Stalmans, J. Poortmans, J. Nijs et. al. // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. – 2000. – Vol. 60, Issue 4. – P. 391–420. doi: 10.1016/S0927-0248(99)00102-6
- Fang, W. Analysis of sunlight loss for femtosecond laser microstructured silicon and its solar cell efficiency [Text] / W. Fang, C. Changshui, H. Huili // *Applied Physics A*. – 2011. – Vol. 103, Issue 4. – P. 977–982. doi: 10.1007/s00339-010-6095-0
- Svavarsson, H. G. Thin film silicon for solar cell application grown from liquid phase on metallurgical grade silicon [Text] / H. G. Svavarsson, D. M. Danielsson and J. T. Gudmundsson // *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*. – Valencia, Spain, 2008. – P. 2221.
- Muller, M. Silicon LPE on substrates from metallurgical silicon feedstock for large scale production [Text] / M. Muller, R. Kopecek, P. Fath, C. Zahedi and K. Peter // *Photovoltaic Energy Conversion, 2003. Proceedings of 3rd World Conference*. – 2003. – Vol. 2. – P. 1221–1224.
- Jinsu, Y. Black surface structures for crystalline silicon solar cells [Text] / Y. Jinsu, Y. Gwonjong, Y. Junsin // *Materials Science and Engineering, B*. – 2009. – Vol. 159-160. – P. 333–337. doi: 10.1016/j.mseb.2008.10.019
- Foil, H., Formation and application of porous silicon [Text] / H. Foil, M. Christophersen, J. Carstensen, G. Hasse // *Materials Science and Engineering R*. – 2002. – Vol. 39. – P. 93–141.
- Salman, K. A. The effect of etching time of porous silicon on solar cell performance [Text] / K. A. Salman, K. Omar, Z. Hassan // *Superlattices and Microstructures*. – 2011 – Vol. 50, Issue 6. – P. 647–658. doi: 10.1016/j.spmi.2011.09.006
- Yerokhov, V. Yu. Porous silicon hydrogenizing for solar cells [Text] : In Proc. of First World Conference [Text] / V. Yu. Yerokhov, I. I. Melnyk, L. Z. Gasko, O. I. Iznin // In Proc. of First World Conference “Porous Semiconductors: Science and Technology”. – Mallorca, Spain, 1998. – P. 169.
- Honda, S. Effect of hydrogen passivation on polycrystalline silicon thin films [Text] / S. Honda, T. Mates, M. Ledinsky // *Thin solid films*. – 2005. – Vol. 487, Issue 1-2. – P. 152–156. doi: 10.1016/j.tsf.2005.01.056
- Yerokhov, V. Yu. Hydrogenated porous silicon in solar cells structure [Text]: In Proc. of 2nd World Conference / V. Yu. Yerokhov, I. I. Melnyk, N. Bogdanovsky, O. I. Iznin // *Photovoltaic Solar Energy Conversion*. – Vienna, Austria, 1998 – P. 1256–1259.
- Bertoni, M. I. Impact of defect type on hydrogen passivation effectiveness in multicrystalline silicon solar cells [Text]: In Proc. of the 35th IEEE / M. I. Bertoni, S. Udelson, B. K. Newman, S. Bernardis et. al. // In Proc. of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). – 2010. – P. 345. doi: 10.1109/pvsc.2010.5616904.

14. Lavine, J. M. Role of Si-H and Si-H<sub>2</sub> in photoluminescence of porous Si [Text] / J. M. Lavine, P. S. Sawan, T. Y. Shieh, A. J. Bellezza // Applied Physics Letters. – 1993 – Vol. 62, Issue 10. – P. 1099–1101. doi: 10.1063/1.108754
15. Banerjee, S. Role of Hydrogen- and oxygen-terminated surfaces in the luminescence of porous silicon [Text] / S. Banerjee, K. L. Narasimhan, A. Sardesai // Physical Review B. – 1994 – Vol. 49, Issue 4. – P. 2915–2918. doi: 10.1103/physrevb.49.2915
16. Дружинін, А. О. Дослідження поверхонь мультикристалічних підкладок кремнію насичених воднем методами мас-спектроскопії [Текст] / А. О. Дружинін, В. Ю. Єрохов, Н. Н. Берченко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 1, № 5(67). – С. 34–37. doi: 10.15587/1729-4061.2014.21053

*Подано експериментальні дані про залежність ерозії поверхневих шарів легованих сталей від часу дії мікроударного навантаження, обумовленого кавітацією. Встановлено аналітичне співвідношення між стійкістю поверхневих шарів сталей до дії кавітації і їх мікротвердістю. Досліджено сталі, поверхневі шари яких модифіковано для підвищення їх стійкості різними способами. Показана можливість збільшення стійкості шляхом нанесення іонно-плазмового покриття на загартований шар*

*Ключеві слова: сталь, поверхневий шар, модифікація, ерозія, аналітичне співвідношення, стійкість, мікротвердість, покриття*

*Представлены экспериментальные данные о зависимости эрозии поверхностных слоев легированных сталей от времени микроударного нагружения, создаваемого кавитацией. Получено аналитическое соотношение между стойкостью поверхностных слоев стали к воздействию кавитации и их микротвердостью. Исследованы стали, поверхностные слои которых модифицированы различными способами с целью увеличения их стойкости. Показана возможность увеличения стойкости путем нанесения ионно-плазменного покрытия на закаленный слой*

*Ключевые слова: сталь, поверхностный слой, модификация, эрозия, аналитическое соотношение, стойкость, микротвердость, покрытие*

УДК 621.793

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40196

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ К ЭРОЗИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ СТАЛЕЙ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КАВИТАЦИИ

**В. И. Коваленко**

Научный сотрудник отдела\*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

**Л. И. Мартыненко**

Заместитель начальника отдела\*

E-mail: kartmazov@kipt.kharkov.ua

**В. Г. Маринин**

Кандидат физико-математических наук, доцент,  
старший научный сотрудник\*

E-mail: marinin@kipt.kharkov.ua

\*Отдел интенсивных

вакуумно-плазменных технологий

Институт физики твердого тела,

материаловедения и технологий

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт»

ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина, 61108

### 1. Введение

Повышение надежности и долговечности деталей машин и механизмов связано в первую очередь с полным или частичным устранением износа, обусловленного различными видами воздействий, в частности, на их поверхностные слои. Одним из специфических видов воздействия являются микроудары, создаваемые кавитирующими полостями при работе оборудования в условиях развитой кавитации, а также быстролетающими каплями жидкости или твердыми частицами. Особенностью такого воздействия является высокая скорость нагружения, малая его продолжительность,

локальность и многократность. При этом в поверхностных слоях возникают напряжения, которые могут быть сравнимы с пределом прочности материала, сосредоточены в объемах, близких к размерам его структурных составляющих. В связи с отсутствием методов прогнозирования прочности (стойкости) материалов в условиях такого нагружения возникает необходимость в получении данных для всех применяемых в промышленности материалов, в том числе, с модифицированными различными способами поверхностными слоями для повышения их износостойкости. На практике это означает – определение наиболее эффективного метода упрочнения из числа известных: де-